

Д. Атті<sup>1</sup>, С. Барсук<sup>2</sup>, О. Безшийко<sup>3</sup>, Л. Бурмістров<sup>2</sup>, А. Чаус<sup>1</sup>, П. Кола<sup>1</sup>, О. Федорчук<sup>3</sup>,  
Л. Голінка-Безшийко<sup>3,\*</sup>, І. Каденко<sup>3</sup>, В. Крилов<sup>2,3</sup>, В. Кубицький<sup>2</sup>, Р. Лопез<sup>4</sup>, Х. Монар<sup>2</sup>,  
В. Родін<sup>3</sup>, М. Тітов<sup>1</sup>, Д. Томассіні<sup>4</sup>, А. Варіола<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Комісаріат атомної та альтернативної енергетики,

Інститут вивчення фундаментальних законів фізики (CEA IRFU), Сакле, Франція

<sup>2</sup> Лабораторія лінійного прискорювача (LAL), Орсе, Франція

<sup>3</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>4</sup> Європейський центр ядерних досліджень, Женева, Швейцарія

\*Відповідальний автор: lyalka@univ.kiev.ua; lyalkagb@gmail.com

## ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ ЧЕРЕНКОВСЬКОГО КВАРЦОВОГО ДЕТЕКТОРА НА СПЕКТРОМЕТРІ LEETECH

Представлено результати моделювань та вимірювань характеристик кварцового черенковського детектора на установці LEETECH для реалізації часопрольотної методики на модернізованому експерименті BES-III та в новому експерименті HIЕРА (КНР). Визначено залежність часового розкиду електронів у пучку від відкриття коліматорів, наведено результати залежності часу реєстрації черенковського випромінювання від просторового зміщення пластини кварцу розмірами  $20 \times 40 \times 200$  мм. Для детектора було експериментально отримано часову роздільну здатність 50 пс. Отримані результати узгоджуються з очікуваними та демонструють можливість застосування даного типу кварцових детекторів для визначення типу частинок.

*Ключові слова:* спектрометр LEETECH, фотоінжектор RHIL, ідентифікація частинок, кварцовий детектор, черенковське випромінювання.

### Вступ

Завдяки численним відкриттям фізика чармонію в останні роки привертає особливу увагу експериментаторів і теоретиків. Багато вже розвинутих експериментів модернізуються й будуються нові дуже вартісні експериментальні установки для досліджень у цих напрямках, включно з дослідженнями D-фізики, спектроскопії легких адронів і  $t$ -фізики, різних проявів нової фізики. Науковці кафедри ядерної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка разом із французькими колегами беруть участь у розробці та дослідженні характеристик нових систем ідентифікації частинок на основі реєстрації черенковського випромінювання, що можуть бути використаними на двох великих експериментальних установках в КНР – HIЕРА (High Intensity Electron Positron Accelerator) [1] та BEPC II/BESIII [2].

Однією з важливих задач реконструкції подій в експериментах із фізики високих енергій є ідентифікація частинок, тобто визначення їхньої інваріантної маси. Наразі існує декілька методик ідентифікації: за іонізаційними енергетичними втратами  $dE/dx$ , за часом прольоту частинок фіксованої відстані, за перехідним випромінюванням (transition radiation) та за кутом розповсюдження черенковського випромінювання [3]. Кожна з них має переваги в певному діапазоні імпульсів частинок [4] та свої конструкційні

особливості [5]. У даній статті досліджено часові характеристики кварцового детектора, який являє собою світловод для черенковського випромінювання, що реєструється на торцях за допомогою фотопомножувачів. Даний тип черенковських детекторів отримав назву DIRC (Detector of Internally Reflected Cherenkov light) [6] та був застосований у детекторних системах в експериментах ВаВаг та SuperB [5, 7].

Джерелом частинок (електронів), що генерують черенковське випромінювання, був спектрометр LEETECH (LAL, Орсе), уведений в експлуатацію у 2015 р. Результати серії вимірювань з алмазним детектором [8] підтвердили можливість окремого генерування заданої кількості електронів (у тому числі одного), що створює умови для дослідження відгуку кварцового детектора як функції кількості частинок у пучку, їхньої енергії та координати входження в речовину кварцового детектора.

### Часові характеристики установки LEETECH

Для розуміння досяжного значення часового розкиду електронів у пучку на виході установки LEETECH було проведено відповідне моделювання в пакеті Geant4 [9]. Часовий розкид вихідного пучка з RHIL не перевищує 10 пс, згідно з дослідженням [10]. Типовий вигляд часового розподілу електронів на виході LEETECH та залежність його ширини від відкриття вихідних коліматорів наведено на рис. 1.

© Д. Атті, С. Барсук, О. Безшийко, Л. Бурмістров, А. Чаус, П. Кола, О. Федорчук, Л. Голінка-Безшийко, І. Каденко, В. Крилов, В. Кубицький, Р. Лопез, Х. Монар, В. Родін, М. Тітов, Д. Томассіні, А. Варіола, 2017

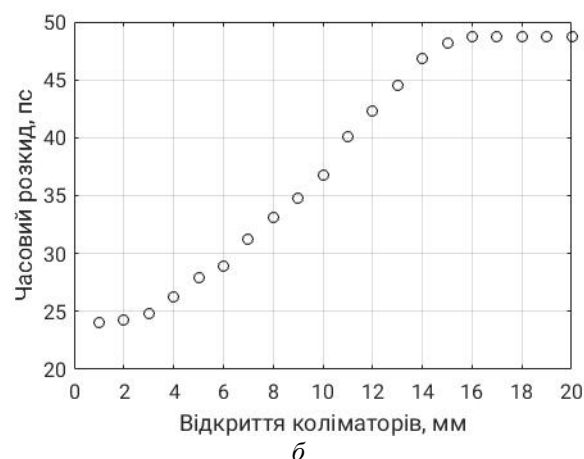
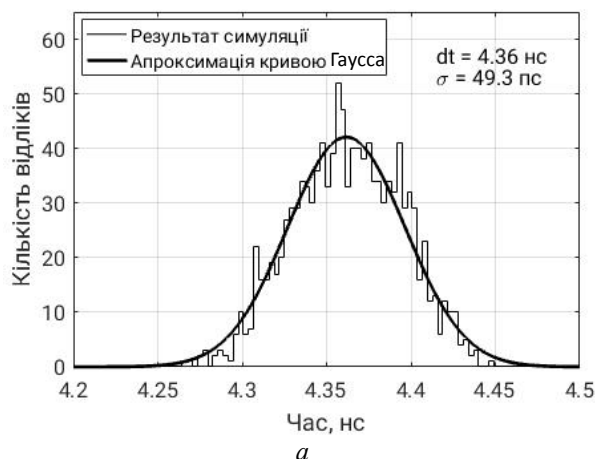


Рис. 1. Розподіл часу прильоту електронів при відкритті коліimatorів  $2 \times 2$  мм на вході та  $20 \times 20$  мм на виході (а) та залежність ширини ( $\sigma$ ) даного розподілу від значення відкриття вихідних коліimatorів (б).

### Підготовка експерименту

Для проведення експерименту нами було використано полірований кварц розмірами  $20 \times 40 \times 200$  мм як позиційно чутливий детектор. Для детектування фотонів на торцях такого детектора було встановлено мікроканальні фотопомножувачі (Micro-Channel Plate Photomultiplier, MCP-PMT) типу Berl (4 канали) та Hamamatsu (16 каналів). Для захисту від фотонів кварцовий детектор було розміщено в металевому корпусі, а виводи сигнальних дротів максимально захищено непрозорою стрічкою. Зовнішній вигляд детекторної установки наведено на рис. 2.

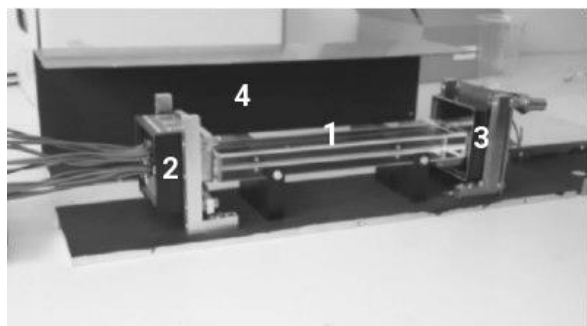


Рис. 2. Детекторна установка у відкритому вигляді. На торцях кварцового детектора (1) встановлено мікроканальні фотопомножувачі Hamamatsu (2) та Berl (3). Під час експерименту детектор щільно закривається металевим корпусом із нанесеним зсередини поглинаючим покриттям (4).

Для зчитування сигналів із мікроканальних фотопомножувачів використовувався осцилограф LeCroy WavePro 740Zi-A зі смугою пропускання 4 ГГц та частотою оцифрування 40 ГГц. Характерні сигнали з обох MCP-PMT при реєстрації черенковського випромінювання представлено на рис. 3. На фоні шуму та наведеного періодичного сигналу для детектора Berl можна бачити чіткі піки, що відповідають реєстрації сигналу від вихідного пучка LEETECH.

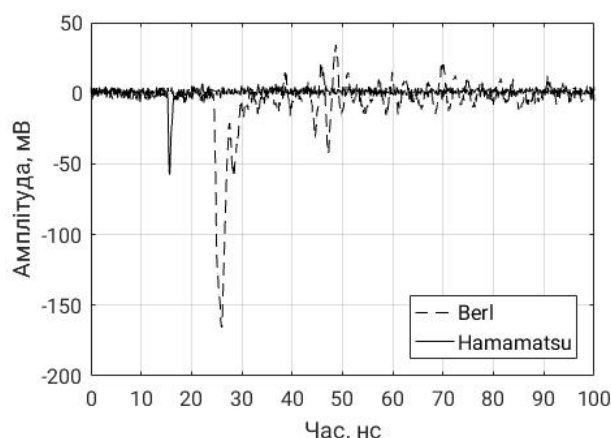


Рис. 3. Типові сигнали з MCP-PMT детекторів, розташованих на торцях кварцової пластини. Типовий час наростаючого фронту для фотопомножувача Berl 1,5 нс, для Hamamatsu 0,4 нс. Середня амплітуда фону 15 та 4 мВ відповідно.

### Результати вимірювань

Для визначення максимально кращої досяжної часової роздільної здатності для даної детекторної установки інтенсивність пучка на виході LEETECH було налаштовано на максимальне значення. Використовуючи мішень розсіювання товщиною 100 мкм при повністю відкритих коліimatorах, було встановлено величину магнітного поля, що відповідала максимуму амплітуди сигналу, при цьому середнє значення кінетичної енергії електронів становило 2,95 MeV.

Було досліджено залежність різниці часу реєстрації сигналу з кінців кварцу від його зміщення відносно центра пучка. Характерний вигляд розподілу різниці часу представлено на рис. 4.

Моментом приходу сигналу вважався час, при якому рівень сигналу на наростаючому фронті дорівнював половині максимуму сигналу. Оскільки часовий проміжок між точками сигналу є фіксованим і відповідає частоті оцифрування, момент досягнення половини амплітуди розрахо-

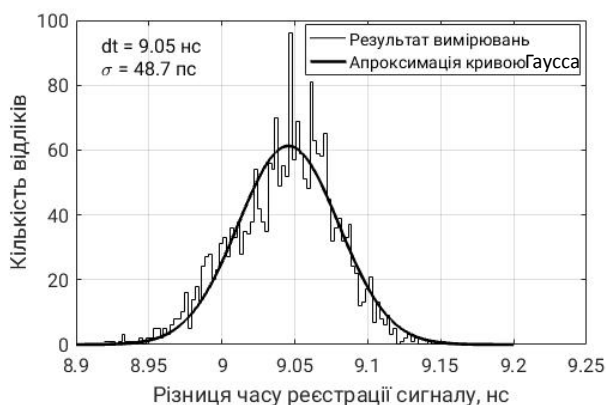


Рис. 4. Розподіл різниці часу приходу сигналу на кінцях кварцового детектора.

вувався методом лінійної інтерполяції за двома сусідніми точками. Даний алгоритм є реалізацією методу digital Constant Fraction Discriminator (dCFD), який дозволяє отримати значення часової роздільної здатності менше, ніж період оцифрування сигналу [11 - 14]. У результаті апроксимації кривою Гаусса експериментальних даних отримано значення ширини розподілу ~ 50 пс.

Результати залежності середньої різниці часу від зміщення центра кварцового детектора відносно осі пучка представлено на рис. 5.

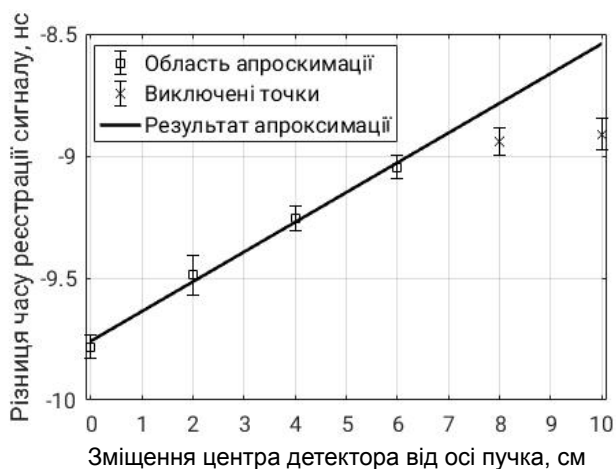


Рис. 5. Залежність різниці часу реєстрації сигналу на кінцях кварцового детектора залежно від його зміщення відносно центра пучка.

Дві останні точки відповідають крайовим умовам, тобто коли пучок входить у матеріал детектора близько до його границі. При повністю відкритих вихідних коліматорах (20 × 20 мм) розмір пучка стає порівняним із відстанню до фотодетектора і лінійна пропорційність втрачається,

тому при лінійній апроксимації залежності відповідні точки не бралися до уваги.

У результаті апроксимації отримано коефіцієнт нахилу  $p1 = 0,12 \pm 0,03$  нс/см, що дає змогу розрахувати швидкість розповсюдження черенковського світла вздовж кварцу

$$V_x = 2 \cdot \frac{1}{p1} = 16 \pm 4 \frac{\text{см}}{\text{нс}}, \quad (1)$$

у той час як теоретичний розрахунок дає значення

$$V_x = \frac{c}{n} \cos(\theta) = \frac{c}{n^2 \beta} = 1,35 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{с}} = 13,5 \frac{\text{см}}{\text{нс}}, \quad (2)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість поширення світла у вакуумі;  $n = 1,46$  – показник заломлення світла у кварцовому склі. Для електронів кінетичної енергії 2,95 MeV релятивістський фактор  $\beta$  дорівнює 0,99.

### Обговорення та висновки

Отримані результати свідчать про доцільність використання спектрометра LEETECH для характеристики кварцових черенковських детекторів. Виміряна нами часова роздільна здатність 48,7 пс включає в себе розкид усіх компонентів прискорювальної системи – фотоінжектора РНІЛ, спектрометра LEETECH, роздільну здатність обох МСРРМТ і, власне, кварцового детектора. Результат добре узгоджується зі значенням, отриманим шляхом моделювання експериментальних умов у Geant4 (49,3 пс). Виміряна нами залежність різниці часу приходу сигналу на границях кварцового детектора від його зміщення від осі пучка узгоджується з теоретичними розрахунками в межах похибки.

Заплановано наступні серії вимірювань для вивчення залежності ширини розподілу різниці часу як функції кількості електронів у пучку. Для вивчення ролі кожної складової в загальне уширення розподілу також заплановано вивчення функції відгуку кварцу внаслідок реєстрації космічного випромінювання (мюони) на телескопі CORTO (LAL, Орсе).

Дослідження було проведено в рамках наукової програми IDEATE International Associated Laboratory (LIA) та за часткової підтримки Державним фондом фундаментальних досліджень (договори № Ф79/132-2017, № 2/К-17, № 5-N-2017).

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Z. Zhou et al. Preliminary Concept and Key Technologies of HIEPA Accelerator. In: Proc. of the 7-th Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC'16) (Busan, Korea, May 8 - 13, 2016) (Geneva, JACoW, 2016) 3895.
2. Y. Wang et al. *Physics at BES-III* (World Scientific, 2009).
3. P. Krizan. Overview of particle identification techniques. *Nucl. Instrum. Meth. A* 706 (2013) 48.

4. M. Shao et al. Extensive particle identification with TPC and TOF at the STAR experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A* 558(2) (2006) 419.
5. I. Adam et al. The DIRC particle identification system for the BaBar experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A* 538(1) (2005) 281.
6. P. Coyle et al. The DIRC counter: a new type of particle identification device for B factories. *Nucl. Instrum. Meth. A* 343(1) (1994) 292.
7. J. Benitez et al. Status of the fast focusing DIRC (fDIRC). *Nucl. Instrum. Meth. A* 595(1) (2008) 104.
8. V. Kubyskyi et al. Study of low multiplicity electron source LEETECH with diamond detector. *Journal of Instrumentation* 12(02) (2017) P02011.
9. S. Agostinelli et al. Geant4 - A Simulation Toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A* 506 (2003) 250.
10. R. Roux et al. PHIL: a test beamline at LAL. In: Proc. of EPAC08 (Genoa, Italy, 2008) 2698.
11. L. Bardelli et al. Time measurements by means of digital sampling techniques: a study case of 100ps FWHM time resolution with a 100MSample/s, 12bit digitizer. *Nucl. Instrum. Meth. A* 521 (2004) 480.
12. D. Breton et al. The WaveCatcher family of SCA-based 12-bit 3.2-GS/s fast digitizers. In: Proc. of the Real Time Conference (19th IEEE-NPSS) (IEEE, 2014) 1.
13. O. Atanova et al. Measurement of the energy and time resolution of a undoped CsI + MPPC array for the Mu2e experiment. *Journal of Instrumentation* 12(05) (2017) P05007.
14. Y. Hai-Bo et al. Application of the DRS4 chip for GHz waveform digitizing circuits. *Chinese Physics C* 39(5) (2015) 056101.

Д. Агги<sup>1</sup>, С. Барсук<sup>2</sup>, О. Бешейко<sup>3</sup>, Л. Бурмистров<sup>2</sup>, А. Чаус<sup>1</sup>, П. Кола<sup>1</sup>, А. Федорчук<sup>3</sup>,  
Л. Голинка-Бешейко<sup>3,\*</sup>, И. Каденко<sup>3</sup>, В. Крылов<sup>2,3</sup>, В. Кубицкий<sup>2</sup>, Р. Лопез<sup>4</sup>, Х. Монар<sup>2</sup>, В. Родин<sup>3</sup>,  
М. Титов<sup>1</sup>, Д. Томассини<sup>4</sup>, А. Вариола<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Комиссариат атомной и альтернативной энергетики,  
Институт изучения фундаментальных законов физики (CEA IRFU), Сакле, Франция

<sup>2</sup> Лаборатория линейного ускорителя (LAL), Орсе, Франция

<sup>3</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

<sup>4</sup> Европейский центр ядерных исследований, Женева, Швейцария

\*Ответственный автор: lyalka@univ.kiev.ua; lyalkagb@gmail.com

#### ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ ЧЕРЕНКОВСЬКОГО КВАРЦОВОГО ДЕТЕКТОРА НА СПЕКТРОМЕТРЕ LEETECH

Представлены результаты моделирования и измерений на установке LEETECH с прототипом кварцевого черенковского электронов в пучке от открытия коллиматоров. Представлены результаты зависимости времени регистрации черенковского детектора, который является кандидатом для реализации времяпролетной методики на модернизированном эксперименте BES-III и новом эксперименте HIEPA в Китае. Определена зависимость временного разброса излучения от пространственного смещения пластины кварца размерами 20 × 40 × 200 мм. Временная разрешающая способность 50 пс получена на эксперименте. Результаты согласуются с ожидаемыми и демонстрируют возможности применения данного типа кварцевых детекторов для определения типа частиц.

*Ключевые слова:* спектрометр LEETECH, фотоинжектор PHIL, тестовые пучки, кварцевый детектор, черенковское излучение.

D. Attie<sup>1</sup>, S. Barsuk<sup>2</sup>, O. Bezshyyko<sup>3</sup>, L. Burmistrov<sup>1</sup>, A. Chaus<sup>1</sup>, P. Colas<sup>1</sup>, O. Fedorchuk<sup>3</sup>,  
L. Golinka-Bezshyyko<sup>3,\*</sup>, I. Kadenko<sup>3</sup>, V. Krylov<sup>2,3</sup>, V. Kubyskyi<sup>2</sup>, R. Lopez<sup>4</sup>, H. Monard<sup>2</sup>,  
V. Rodin<sup>3</sup>, M. Titov<sup>1</sup>, D. Tomassini<sup>4</sup>, A. Variola<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Commissariat of Nuclear and Alternative Energy,  
Institute for the Study of Fundamental Laws of Physics (CEA IRFU), Saclay, France

<sup>2</sup> Linear Accelerator Laboratory (LAL), Orsay, France

<sup>3</sup> Kyiv National Taras Shevchenko University, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup> European Center for Nuclear Research, Geneva, Switzerland

\*Corresponding author: lyalka@univ.kiev.ua; lyalkagb@gmail.com

#### QUARTZ BAR CHERENKOV DETECTOR CHARACTERIZATION AT THE LEETECH SPECTROMETER

Results of simulation and measurements on the LEETECH facility with quartz Cherenkov detector prototype which is one of the candidates for the time-of-flight technique implementation at the upgraded BES-III and HIEPA (China) experiments are presented. The dependence of the electrons time variation from opening of the collimators is determined. The results of the dependence of time registration of Cherenkov exposure from spatial displacement of the quartz bar with the size 20 × 40 × 200 mm are presented. Time resolution of 50 ps was measured during the experiment. The obtained results are in agreement with the expected and demonstrate the possibility of the application of quartz detectors of this type for determining the kinds of the particles.

*Keywords:* LEETECH spectrometer, PHIL photoinjector, test beams, quartz detector, Cherenkov radiation.

REFERENCES

1. Z. Zhou et al. Preliminary Concept and Key Technologies of HIEPA Accelerator. In: Proc. of the 7-th Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC'16) (Busan, Korea, May 8 - 13, 2016) (Geneva, JACoW, 2016) 3895.
2. Y. Wang et al. *Physics at BES-III* (World Scientific, 2009).
3. P. Krizan. Overview of particle identification techniques. *Nucl. Instrum. Meth. A* 706 (2013) 48.
4. M. Shao et al. Extensive particle identification with TPC and TOF at the STAR experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A* 558(2) (2006) 419.
5. I. Adam et al. The DIRC particle identification system for the BaBar experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A* 538(1) (2005) 281.
6. P. Coyle et al. The DIRC counter: a new type of particle identification device for B factories. *Nucl. Instrum. Meth. A* 343(1) (1994) 292.
7. J. Benitez et al. Status of the fast focusing DIRC (fDIRC). *Nucl. Instrum. Meth. A* 595(1) (2008) 104.
8. V. Kubytskyi et al. Study of low multiplicity electron source LEETECH with diamond detector. *Journal of Instrumentation* 12(02) (2017) P02011.
9. S. Agostinelli et al. Geant4 - A Simulation Toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A* 506 (2003) 250.
10. R. Roux et al. PHIL: a test beamline at LAL. In: Proc. of EPAC08 (Genoa, Italy, 2008) 2698.
11. L. Bardelli et al. Time measurements by means of digital sampling techniques: a study case of 100ps FWHM time resolution with a 100MSample/s, 12bit digitizer. *Nucl. Instrum. Meth. A* 521 (2004) 480.
12. D. Breton et al. The WaveCatcher family of SCA-based 12-bit 3.2-GS/s fast digitizers. In: Proc. of the Real Time Conference (19th IEEE-NPSS) (IEEE, 2014) 1.
13. O. Atanova et al. Measurement of the energy and time resolution of a undoped CsI + MPPC array for the Mu2e experiment. *Journal of Instrumentation* 12(05) (2017) P05007.
14. Y. Hai-Bo et al. Application of the DRS4 chip for GHz waveform digitizing circuits. *Chinese Physics C* 39(5) (2015) 056101.

Надійшла 27.07.2017

Received 27.07.2017